

大型双曲冷却塔内表面风荷载的数值模拟

沈国辉¹, 张陈胜², 孙炳楠¹, 楼文娟¹

(1. 浙江大学 土木工程学系, 310027 杭州, ghshen@zju.edu.cn; 2. 中国汉嘉设计集团, 310005 杭州)

摘要: 为了获得大型冷却塔的内表面风压, 应用 CFD 数值模拟方法进行计算, 分别采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型和多相流模型计算由外风场作用和冷热空气自循环系统产生的内压, 并分析这 2 种内压沿高度和纬度的分布规律, 进行 2 种内压的合成计算, 最后给出冷却塔内压的建议值. 计算结果表明: 外风场作用产生的内压随高度和纬度变化明显, 自循环系统产生的内压沿着纬度几乎不变. 当外风场风速较小时, 自循环系统产生的内压在合成内压中占一定的比例, 当外风场风速较大时, 自循环系统产生的内压可以忽略.

关键词: 冷却塔; 风荷载; 数值模拟; 内压; 多相流

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)04-0104-05

Numerical simulation of wind load on inner surface of large hyperbolic cooling tower

SHEN Guo-hui¹, ZHANG Chen-sheng², SUN Bing-nan¹, LOU Wen-juan¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, 310027 Hangzhou, China, ghshen@zju.edu.cn;

2. Hanjia Design Group of China, 310005 Hangzhou, China)

Abstract: The computational fluid dynamics (CFD) methodology is employed to obtain the wind pressures on the inner surface of large hyperbolic cooling towers. The wind pressures on the inner surface of cooling tower, which are induced by the action of outer wind field and self-circulating system due to air temperature difference, are calculated numerically with the $k-\varepsilon$ turbulence model and multiphase model, respectively. The distributions of these two parts of wind pressure with respect to height and latitude are then investigated. The resultant wind pressures on inner surface on cooling tower are obtained and their suggestive values are given. Results from this study show that the wind pressures on inner surface induced by the action of outer wind field vary significantly with heights and latitudes, whereas those induced by self-circulating system keep almost unchanged with respect to latitude. If the velocity of outer wind field is small, the wind pressure on inner surface induced by self-circulating system will occupy a certain proportion of the resultant wind pressures, while if the velocity is large, it can be neglected.

Key words: cooling tower; wind load; numerical simulation; inner wind pressure; multiphase flow

大型冷却塔是一种双曲线型的混凝土薄壁建筑物, 风荷载是主要的控制荷载. 冷却塔顶部敞开, 底部有起风通道作用的人字柱, 因此其内外表面均受到风荷载作用. 对于冷却塔外表面的风荷

载, 已有较多的研究成果^[1-3], 水冷却设计规范对其也有规定^[4]; 而对于内表面的风荷载, 相关的研究不多, 水冷却设计规范没有相关规定. 冷却塔内表面的风荷载由 2 部分组成, 即由外风场对内表面产生的荷载作用和由冷却塔基于自然通风原理形成的冷热空气自循环系统产生.

对于冷却塔内表面的风荷载, 已有的一些成果主要是研究外风场作用引起的内压, 几乎没有涉及由冷热空气自循环系统产生的内压. 现场实

收稿日期: 2009-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608063).

作者简介: 沈国辉(1977—), 男, 副教授;

孙炳楠(1940—), 男, 教授, 博士生导师;

楼文娟(1963—), 女, 教授, 博士生导师.

测方面,Matin' s Creek 塔的风压实测时已考虑了内外表面的风压差,但数据处理时假定内表面的风压系数为 $-0.4^{[5]}$;茂名塔的风压实测中,发现内表面的风压系数在 50 m 高度周向基本不变^[6]. 在风洞试验方面,Kasperski 等^[7]发现内压沿高度和周向基本不变,风压系数接近 -0.5 . 上述成果均认为冷却塔内压沿高度和纬度基本不变,实际上由于受底部通风口和顶部开口的影响,内压应呈三维分布特性.

本文采用 CFD 中的可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型和多相流模型,计算外风场作用和冷热空气自循环系统产生的内压,分析这 2 部分内压沿高度和纬度方向的分布规律,进行 2 种内压的合成计算和分析,最后给出冷却塔内表面风压系数的建议值.

1 大型双曲冷却塔的概况

双曲冷却塔是具有负高斯曲率的双曲壳体,母线由 2 条双曲线在颈部衔接而成,母线绕中轴线旋转形成塔身. 塔筒底部为进风口,由人字柱支撑. 大型冷却塔的工作原理为:塔外冷空气从塔底进风口进入冷却塔后,吸收由热水蒸发和接触散失的热量,温度增加,湿度变大,密度变小;塔外的空气温度低、湿度小、密度大;由于塔内外空气密度差异,产生压差,使塔外空气源源不断地流进塔内,该原理也称为自然通风.

图 1 为某发电厂淋水面积为 9 000 m² 的冷却塔,高 150 m,底部直径 118.9 m,顶部直径 71.39 m,颈部高 112.5 m,颈部直径 66.72 m. 底部由 48 对人字柱支撑,人字柱高 10.3 m. 冷却塔所处地貌场地为 B 类,50 a 一遇的基本风压为 0.45 kN/m².

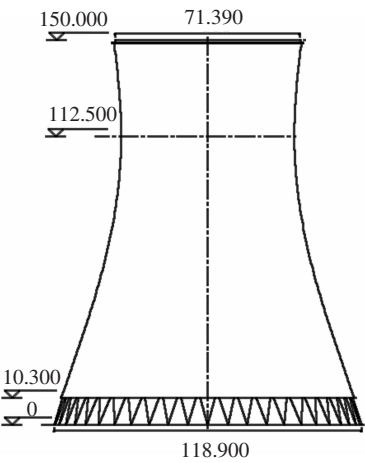


图 1 某双曲冷却塔的立面尺寸(m)

2 外风场作用产生的内压

2.1 计算模型和网格划分

CFD 计算采用的湍流模型为可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型. 网格划分采用 Tgrid 网格,冷却塔实体内外表面采用 0.5 m 网格间距,地面网格由人字柱处的 0.5 m 网格间距向外增大,整个计算区域长宽高尺度分别为 1 600、1 200 和 1 000 m,网格总数为 3 626 121,网格划分见图 2.

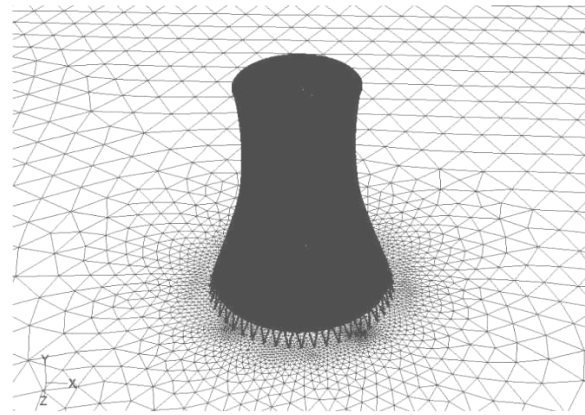


图 2 冷却塔的网格划分示意图

采用非平衡的壁面函数法来处理近壁面的湍流状态. 进流面选用速度入口,风速随高度的变化服从指数规律,入口处的湍流强度为

$$I_u = A \left(\frac{z}{H} \right)^{-\alpha-0.05} \tag{1}$$

式中 A 为常数, H 为参考高度,要求离地面 30 m 高度处湍流强度达到 16%. 速度和湍流强度的分布通过编写 UDF 程序在边界条件中得到实现.

计算在 FLUENT 环境下完成,采用 3D 单精度、Pressure based 求解器,空气模型选用理想气体模型(ideal-gas),对流项的离散采用的一阶迎风格式,速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法.

冷却塔表面风压系数的定义为

$$C_p(\theta, z) = \frac{p(\theta, z) - p_\infty(z)}{q_\infty(H)} \tag{2}$$

式中: $p(\theta, z)$ 为冷却塔纬向角度为 θ , 高度为 z 时的风压; $p_\infty(z)$ 为高度 z 处无穷远的来流静压; $q_\infty(H)$ 为塔顶高度 H 处无穷远的来流动压; θ 为纬度角, θ 定义如图 3 所示.

2.2 冷却塔内表面的流场特征

图 4 给出外风场作用下冷却塔内表面的流场,可以发现在塔筒内部从塔底至颈部附件区域形成一个漩涡. 其形成原因为:从底部人字柱进入塔内的气流撞击塔筒背风区的内壁,并沿着背风区内壁向上爬升,在颈部附近由于颈缩口的影响,

上升气流受到一定程度的阻滞,部分气流被迫沿着冷却塔迎风侧的内壁面流回底部.塔顶由于外部气流从顶部掠过,带动筒内顶部气流的快速流动.

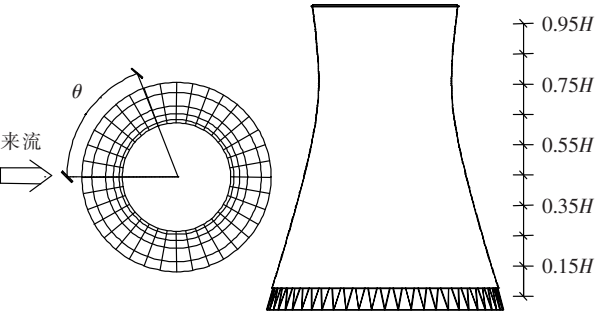


图 3 冷却塔的纬度角和高度示意图

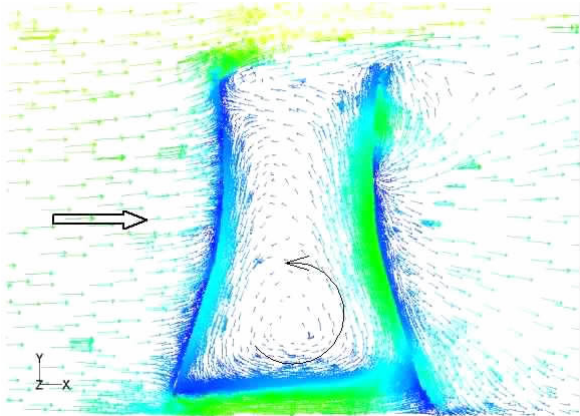


图 4 外风场作用下冷却塔内表面的流场分布

2.3 冷却塔内表面的风压分布

图 5 给出外风场作用下冷却塔内表面相对高度 $z/H = 0.15 \sim 0.95$ 处的风压系数,图中也给出沿高度平均后的风压系数.由图可知:1)内表面风压系数随高度和纬度变化明显,沿高度平均后的风压系数为 $-0.43 \sim -0.52$,与文献[5,7]中的 $-0.4 \sim -0.5$ 比较接近.2) $z/H = 0.15$ 高度处的风压系数曲线波动最大,在纬向角 90° 处达到最小值,在纬向角 180° 附近由于受到从底部人字柱进来的气流的正面撞击达到最大值.3) $z/H = 0.85$ 和 $z/H = 0.95$ 高度处的风压系数曲线在纬向角 180° 附近出现波峰,主要是外部气流从冷却塔顶部掠过,带动塔内顶部气流的快速流动.

2.4 内表面风压的 CFD 与风洞试验结果比较

针对该冷却塔进行 1:300 缩尺比的风洞试验,模拟的地貌为 B 类.冷却塔模型采用夹层中空结构,在模型内外表面均布置风压测点,其中内表面测点沿高度布置 5 层,每个测层沿环向均匀布置 12 个测点.风洞试验的具体情况见文献[8].

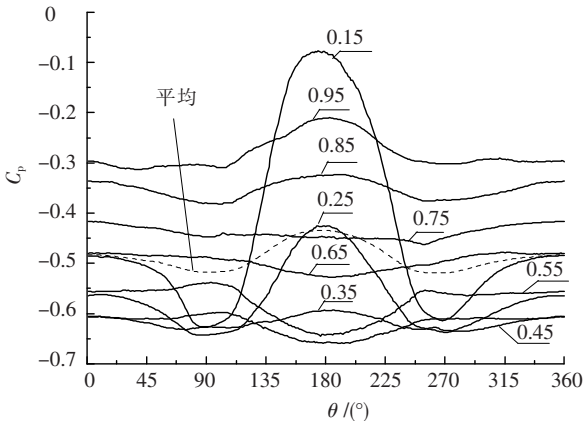


图 5 冷却塔内表面不同 z/H 比值的风压系数分布

图 6 给出 $z/H = 0.133$ 和 $z/H = 0.933$ 高度处 CFD 与风洞试验结果的比较,可以发现 CFD 与风洞试验方法获得的风压系数总体上比较接近,数据分布趋势也比较吻合.在 $z/H = 0.133$ 高度处,两组风压系数在纬向角 180° 附近均出现一个明显的峰值.在 $z/H = 0.933$ 高度处,两组风压系数在纬向角 180° 附近均出现一个峰值.说明本文采用 CFD 方法进行冷却塔内表面风压的计算具有较高的准确度.

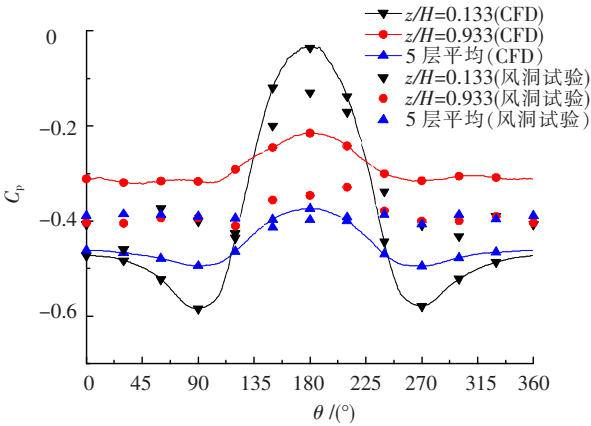


图 6 冷却塔内压的 CFD 和风洞试验结果比较

3 自循环系统产生的内压

冷却塔在工作时由于冷热空气产生压差形成自循环系统,现场实测和风洞试验手段很难单独获得该系统下的内压,而 CFD 方法使冷却塔自循环系统的模拟成为可能.本文采用多相流模型进行自循环内压的计算,并假定外风场和自循环系统之间相互不影响.

3.1 多相流计算模型

Wet steam 模型是 Fluent 特有的多相流模型^[9],其为两相混合物,主要相是气相,由水蒸汽组成,由凝结水滴组成的液相是第二相.混合流由可压缩 N-S 方程控制为

$$\frac{\partial W}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \int Q dV + \oint (F - G) dA = \int H dV. \quad (3)$$

式中: W 为守恒量; Q 为初始变量; F 、 G 分别为包含体积力和能量源的源项; V 为体积。

填料层一方面是一个热源,起到加热空气的作用,另一方面,它允许气流穿过,但有一定的阻挡作用,在 CFD 中可采用多孔介质来模拟填料层。多孔介质的模拟是通过标准流体方程添加 1 个动量源项,这个源项由两 2 部分组成:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right). \tag{4}$$

方程右边第 1 项为粘滞损失项,第 2 项为惯性损失项。式中 S_i 为第 i 个方向动量方程的源项, $|v|$ 为速度的大小, D 和 C 为指定的矩阵, ρ 为空气密度。

3.2 计算工况和网格设置

由于多相流计算非常耗时,根据冷却塔的双轴对称性可取冷却塔的四分之一作为计算模型。网格划分采用具有良好拓扑性的非结构 Hex/Wedge 网格,使其适应冷却塔复杂的形状。在底部柱子上方设立两个 Interior 边界,所夹区域为填料层,高度为 2.12 m,填料层区域设为多孔介质边界条件。

自循环系统计算的总网格数为 87.8 万,网格划分如图 7 所示。多孔介质的空隙率取为 0.8^[10],固体材料设为铝,热源项取为 5 000 W/m³,假定大气温度为 300 K。计算采用 3D 单精度, Density based 求解器,隐式方案,空气模型选用理想气体模型,三维湍流模型采用可实现的 $k-\varepsilon$ 模型,多相流模型为 Wet steam,对流项的离散采用二阶迎风格式。

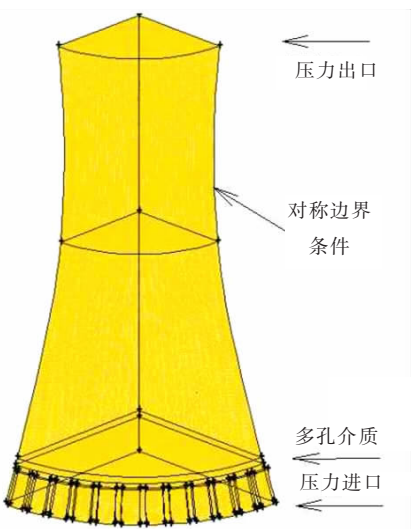
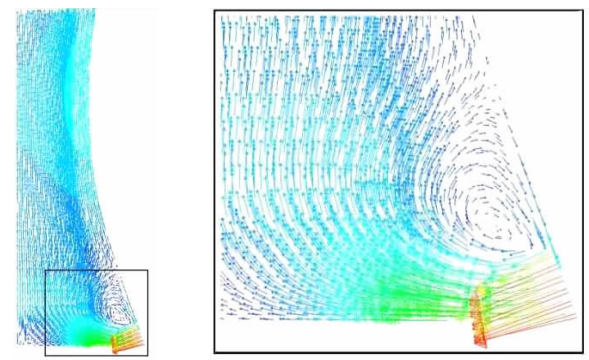


图 7 冷却塔自循环系统的网格和边界条件

3.3 多相流自循环系统的流场特征

由于自循环过程是依靠多孔介质层的热源加热逐步形成,因此整个计算所需时间相当长。待计

算收敛后,在纬向角 $\theta = 45^\circ$ 处截取风速矢量图剖面,如图 8 所示。可以发现底部入口处流速很快,达到 3.2 m/s;在入口区上方靠近壁面处形成一漩涡。流场的气流运动在经历入口处的调整后逐步达到均匀。填料层的气流流速为 0.94 m/s,在文献[10]中提到的冷却塔填料层的常见风速为 1.0 ~ 1.2 m/s,两者较为吻合。



(a) 矢量图 (b) 局部放大图
图 8 冷却塔自循环系统 $\theta = 45^\circ$ 截面处的速度矢量图

3.4 多相流自循环系统的压力分布

图 9 给出了冷却塔自循环系统 $z/H = 0.15 \sim 0.95$ 高度处的压力曲线,由图可知:1) 各高度处的压力曲线基本上为直线,内压沿纬度角几乎不变。2) 压力绝对值随着高度增加而减小。3) 各位置的压数值很小,范围为 $-0.5 \sim -5.1$ Pa。

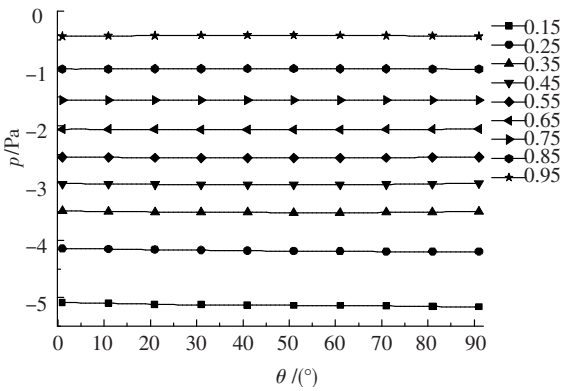


图 9 不同 z/H 值时冷却塔自循环系统各截面处的压力

4 两种内压的合成计算

针对这两种内压数据进行合成计算和分析,不考虑两种内压间的相互影响。图 10 给出了 3 种外风场风速情况下的 2 种内压合成后的数据,外风场 10 m 高度处的风速分别取 15 和 26.8 m/s。由图可知,当外风场风速较小时,自循环系统产生的内压在合成内压中占有一定的比例;而当外风场风速较大,如来流为基本风速 26.8 m/s 时,自循环系统产生的内压可以忽略。而冷却塔设计中通常考虑高风速情况,此时冷却塔内表面风压可不必考虑由自循环系统产生的内压。

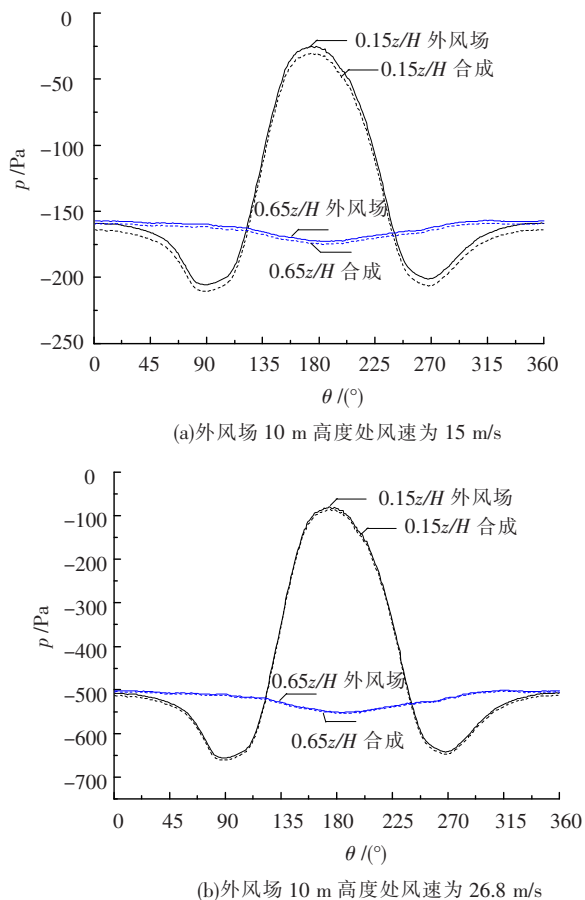


图 10 不同外风场风速下冷却塔内表面的风压

为了供冷却塔风压设计的参考,图 11 给出本文 CFD 方法获得的冷却塔内表面风压系数的等压线。图中将纬度角分为 4 等分,中轴线为纬度角 0° 情况;在高度方向上分为 5 等分,从上往下高度线分别为 $z/H = 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ 和 0.07 ,底部为透风的人字柱,没有风压。

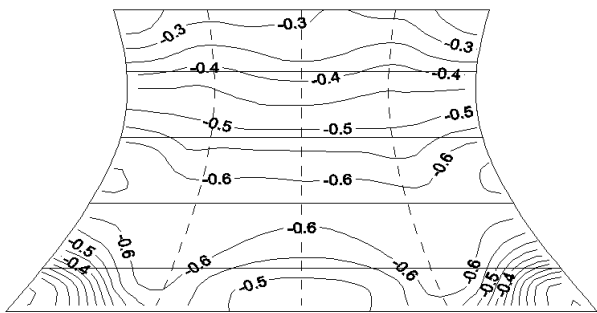


图 11 CFD 方法获得的冷却塔内表面风压系数

5 结 论

1) 采用 CFD 方法对外风场作用和自循环系统产生的内压进行模拟计算,发现外风场作用产生的内压随高度和纬度变化明显,沿高度平均的风压系数在 $-0.43 \sim -0.52$ 之间,与以往文献的 $-0.4 \sim -0.5$ 较为接近。

2) 针对外风场作用产生的内压,CFD 与风洞试验获得的结果总体上比较接近,数据分布趋势也比较吻合,说明采用 CFD 方法进行冷却塔内表面风压的计算具有较高的准确度。

3) 对采用多相流模型计算冷却塔的自循环系统产生的内压,发现该风压沿着纬度角几乎不变,压力绝对值随高度增加而减小,变化范围为 $-0.5 \sim -5.1$ Pa。

4) 当外风场风速较小时,自循环系统产生的内压在合成内压中占有一定的比例;当外风场风速较大(如来流为基本风速)时,自循环系统产生的内压可以忽略。给出了 CFD 计算获得的冷却塔内表面风压系数的等压线图,可供设计人员参考。

参考文献:

- [1] SUN T F, GU Z F. Interference between wind loading on group of structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54 - 55: 213 - 225.
- [2] 刘若斐. 大型冷却塔的抗风研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [3] 沈国辉, 刘若斐, 孙炳楠. 双塔情况下冷却塔风荷载的数值模拟[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(6): 1017 - 1022.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB/T 50102—2003 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
- [5] BASU P K, GOULD P L. Cooling towers using measured wind data[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1980, 106(ST3): 579 - 599.
- [6] SUN T F, ZHOU L M. Wind pressure distribution around a ribless hyperbolic cooling tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 14: 181 - 192.
- [7] KASPERSKI M, NIEMANN H J. On the correlation of dynamic wind loads and structural response of natural-draught cooling towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 30: 67 - 75.
- [8] 鲍佩袁. 大型双曲冷却塔的风荷载和风致响应理论分析与试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [9] Fluent Inc. Fluent help documentation[M]. Pennsylvania: Fluent Inc., 2003.
- [10] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.

(编辑 魏希柱)